

# AWR1243センサ： 新規 ADAS アプリケーションに 適した高集積の76 ~ 81GHz レーダ・フロント・エンド



**Karthik Ramasubramanian**

*Radar Systems Manager*

**Brian Ginsburg**

*mmWave Systems Manager*

*Texas Instruments*

## 概要

先進運転支援システム (ADAS) 用途におけるミリ波テクノロジーの採用例は、最近数年の間に大幅に増加してきました。アダプティブ・クルーズ・コントロール (ACC) のような快適性機能から、緊急ブレーキのような安全性機能、また歩行者検出や360度センシングのような最新機能まで、各種アプリケーションは急速な進化を遂げてきています。さらに業界では現在、76 ~ 81GHz周波数帯域への移行を進めています。新規策定されている規制の要件を満たすこと、また、より広い帯域幅が利用可能で、センサ・サイズを小型化でき、性能上の利点が得られることがその理由です。

従来、レーダの実装はディスクリット部品を使用してきましたが、一方で現在の市場では、より集積度の高いソリューションが利用可能になっています。CMOSに、無線周波数 (RF) とアナログ機能、さらにデジタル制御機能をシングルチップ統合した結果、コストの低減とフォーム・ファクタの小型化が実現されています。さらに、このような高集積ソリューションにより、先進的な手法を効率的に実装できるようになり、システム性能を改善することや、デベロッパがオンチップ・プロセッサ・ベースの内蔵セルフ・テスト (BIST) 機能を使用して機能安全への準拠を満たすことが可能になります。

## FMCW レーダのコンセプト

FMCW レーダでは、送信する信号は線形の周波数変調連続波 (L-FMCW) のチャープ・シーケンスであり、周波数と

時間の関係は、**図 1** に赤の線で図示するように、のこぎり波のパターンに従います。

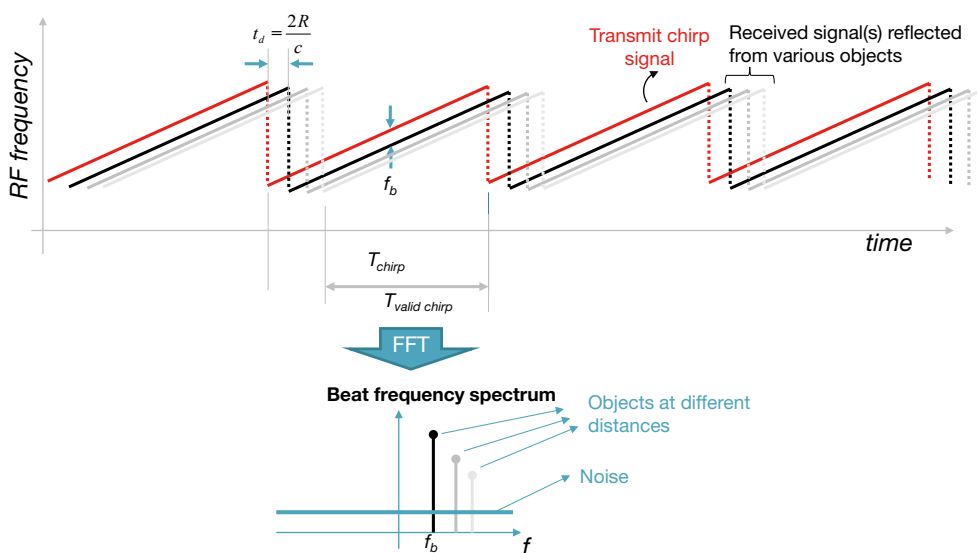


図 1: 受信した FMCW レーダ信号とビート周波数のスペクトル

局部発振器は、L-FMCW 信号を生成します。この信号はチャープ信号とも呼ばれており、増幅され、送信アンテナから送信されます。関心領域内に存在するあらゆる物体は、レーダ照射され、送信された信号を反射して返します。この反射された信号を、局部発振器の信号と混合すると、ビート周波数 (中間周波数 [IF] 周波数) が生成され、これをデジタル化して DSP でその後の処理を行います。

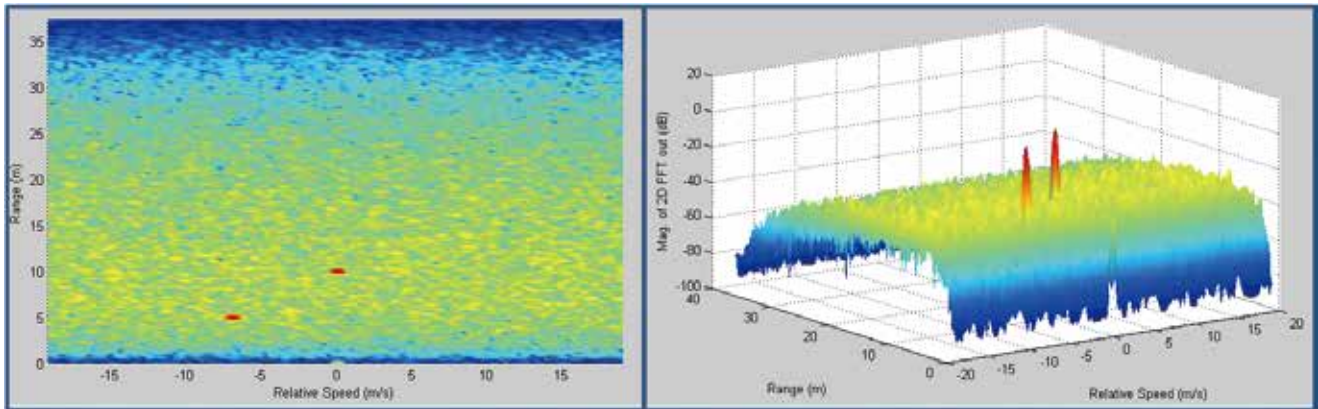


図 2: 2 地点に存在する物体の距離と速度を示すレーダの 2 次 FFT イメージ。および減衰した複数のコピーで形成されています。

図 1 から、(チャープの開始地点と終了地点における境界効果を見無視すると、) 各物体に対応するビート周波数信号がトーンであることがわかります。その周波数 ( $f_b$ ) は、レーダから物体までの距離 (R) に比例します。物体 (ターゲット) を検出し、レーダと物体の距離を判定するプロセスには、ビート周波数信号の高速フーリエ変換 (FFT) を実施し、ノイズフロアを明確に上回っている複数のピークを識別する作業が関係します。

移動している物体を扱う場合、ビート周波数信号は、レーダとターゲットの間の相対速度に依存するドップラー成分も含有することになります。あるチャープとその次のチャープの間でビート信号の位相シフトに注目すると、ドップラー成分は推定可能であり、その結果、相対速度も推定できます。通常、この作業を行うには、複数のチャープにまたがる形で 2 番目の FFT を実行します<sup>[1]</sup>。検出プロセスの一部として、受信サンプルに対し 1 次 FFT を実行します。この FFT は、各チャープに対応しており、その後、複数のチャープにまたがるこの出力に対し、2 次 FFT を実行します。この 2 次 FFT 手続きの結果として、図 2 に示すように、距離 - 速度グリッド (座標系) の中で複数のターゲットのイメージが得られます。

多くの場合、検出プロセスはこの 2 次 FFT の出力に対して実施され、ノイズ・フロア内、または周囲のかく乱要素の中でピークを検出することが関係します。

さらに、検出された物体に関して、複数の TX/RX アンテナを組み合わせたデジタル・ビーム・フォーミングを使用し、角度推定プロセスが実施されます。

したがって、FMCW レーダは、照射先の場面に関する 3 次元 (距離、相対速度、到来角) のイメージを提供することができます。

FMCW に関する包括的な説明は、参考文献セクションに掲載の文献をご覧ください。

### 高速 FMCW 変調の利点

2D FFT 処理の手続きは、高速 FMCW 変調を使用するレーダ実装に適用できます。この点は、三角波を使用する FMCW (低速 FMCW 変調) のような他の手法とは対照的です。高速 (のこぎり波) FMCW 変調では、チャープ持続時間は数十マイクロ秒単位であるのに対し、低速 (三角波) FMCW 変調では、チャープ持続時間はそれよりかなり長く、通常はミリ秒単位になります。

高速 FMCW 変調の主な利点の 1 つは、さまざまな物体の距離と速度を自動的に解明して、2D イメージを形成できることです。

効率的な 2 次 FFT 処理手法により、あいまいさなしで、各物体の距離と速度を高精度で推定できるようになります。複数の物体が存在している場合、この特性は特に重要です。

高速 FMCW 変調のもう 1 つの利点として、さまざまな物体から得られるビート周波数の信号が、フリッカー・ノイズのコーナー周波数より高いという事実を挙げることができます。その結果、信号対ノイズ比 (SNR) が改善され、反射が弱い物体を検出しやすくなります。また、必要とされるローパス・フィルタとハイパス・フィルタをアナログ・ベースバンドのオンチップに実装しているので、外部部品の点数が低減されます。

一方、低速 FMCW 変調を使用する場合、各チャープに対応するビート周波数の信号は、距離情報とドップラー情報の組み合わせを保持しています。右上向きのスロープと右下向きのスロープで形成されたチャープは三角波の形状を取り (図 3)、このチャープを使用すると、ビート周波数に含まれている距離情報とドップラー情報を分離できます。ただし、複数の物体が存在する場合は、この手続きはあいまいさの問題による影響を受け、その結果、信頼性が低下する可能性があります。

あいまいさなしで、距離情報とドップラー情報を自動的に分離できる高速 FMCW 変調の利点は、複数のターゲットが高い密度で存在する場面でレーダ・システムが導入され、新しい使用事例が発生するにつれて、大きな利点になります。

## 新規 ADAS アプリケーションに適した ミリ波フロント・エンドの特長

表 1 に、車載レーダに関する自動車業界の最近の傾向と、ミリ波フロント・エンドの実装に対する暗黙的な前提を示します。

Automotive radar industry trends	mmWave front-end requirements	TI automotive radar
24-GHz SRR → 77-GHz multimode LRR/MRR/SRR	76–81-GHz support, with flexible chirp configurations	<ul style="list-style-type: none"> <li>Support for 76–81-GHz RF frequency</li> <li>Intelligent mmWave front-end with flexible and easy-to-use chirp config</li> </ul>
Slow FMCW → Fast FMCW modulation	Wide IF bandwidth and sampling rate	<ul style="list-style-type: none"> <li>Up to 15-MHz IF bandwidth and 37.5-MSPS ADC sampling rate (AWR1243)</li> </ul>
Discrete → Highly integrated	Integrated Radar-on-a-chip solution	<ul style="list-style-type: none"> <li>TX, RX, LO, ADC integrated in to single chip (AWR1xxx)</li> <li>MCU, HW accelerator (AWR1443)</li> <li>MCU, DSP integrated (AWR1642)</li> </ul>
Digital beamforming, elevation and azimuth	Multiple TX/RX channels and cascading of multiple chips	<ul style="list-style-type: none"> <li>Up to 3 TX, 4 RX (AWR1243, AWR1443)</li> <li>Multichip cascading (AWR1243)</li> </ul>
Newer applications (Pedestrian detection, 360° sensing)	Wide sweep bandwidth with fast ramp slope, precise chirp synthesis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Up to 4-GHz sweep bandwidth</li> <li>Fast ramp slopes up to 100 MHz/μs</li> <li>Highly linear FMCW chirp generation using closed loop PLL</li> </ul>
Comfort functions → Safety functions	Requires better functional safety and monitoring mechanisms	<ul style="list-style-type: none"> <li>Built-in safety monitoring mechanisms controlled by on-chip dedicated BIST processor.</li> </ul>



AWR1243 (+TDA3x), AWR1443 and AWR1642 TI automotive radar solutions

表 1: 業界の傾向とミリ波フロント・エンドの要件

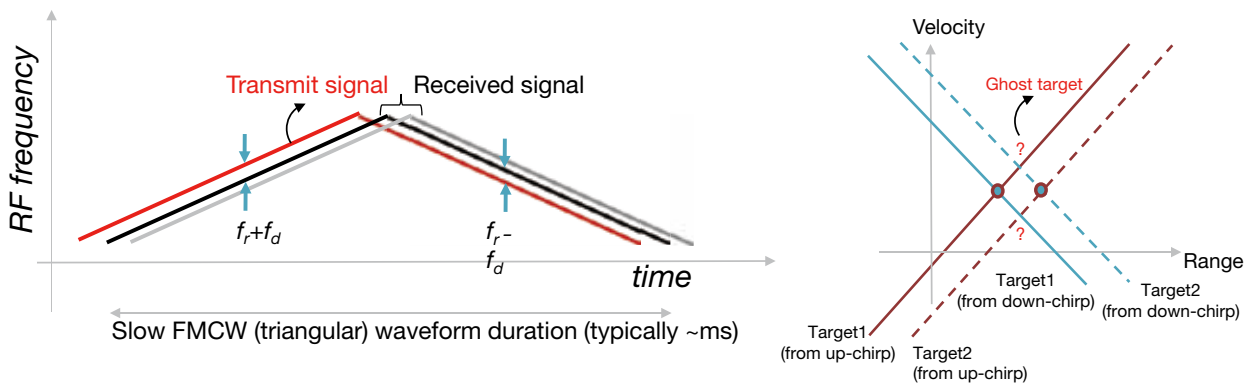


図 3: 代表的なミリ波モジュールの設計。

表 1 に掲載したように、自動車業界の傾向により、ミリ波フロント・エンドに対する要求は高まっています。76 ~ 81GHz マルチモード・ミリ波センサの実装への移行が進んでいます。その理由は、スペクトルに関する規制が制定されており、広い帯域幅が利用でき、センサのフォーム・ファクタを小型化できるほか、他の正常上の利点も得られるからです。この結果、ミリ波フロント・エンド IC は 76 ~ 81GHz の RF 周波数範囲をサポートすることが求められるほか、長距離、中距離、短距離の各レーダ(LRR/MRR/SRR) アプリケーションに対応するさまざまなチャープ・プロファイルを構成するためのフレキシビリティも要求されます。緊急ブレーキのような安全性機能を目的としてミリ波を使用する場合、機能安全と監視に関する追加の要件が発生します。

RF 仕様の点では、より新しいレーダ・アプリケーションの方が、広い RF 掃引帯域幅、高速ランプ・スロープ、広い IF 帯域幅、高精度のチャープ合成という特長から、大きな利点を得ることができます。これらの特長が、レーダ・システムの性能に及ぼす利点を簡単に説明します。

### 広い RF 掃引帯域幅

FMCW レーダをシステム・レベルで考えた場合の性能は、チャープのパラメータに依存します。表 2 に、代表的なレーダシステムで見受けられる、距離、速度、角度の各分解能がミリ波フロント・エンドの構成にどのように依存するかを示します。

Parameter	Performance dependency	Comments
Range resolution	Inversely proportional to RF sweep bandwidth	A wide RF sweep bandwidth capability gives better range resolution
Velocity resolution	Proportional to wavelength and inversely proportional to frame duration	A smaller wavelength (77 GHz) and longer frame time give better velocity resolution
Angular resolution	Inversely proportional to aperture width	More TX/RX channels with digital beamforming give better angular resolution

図 2: FMCW レーダのシステム性能。

より高い距離分解能、速度分解能、角度分解能に関するニーズの増加は、より厳しい条件が要求される ADAS アプリケーションで見受けられます。距離、速度、角度の各分解能が高くなると、いくつかの利点を実現します。密着した位置にある複数のターゲットをより良好に区分し、物体の識別と分類を行うためのより良好な情報を入手できます。たとえば、高い空間分解能(距離と角度の分解能)を達成すると、2つの物体間にすきまが存在していることが理解でき、それらを分離して1台ではなく2台の車両であると識別、または車両の近くに子供がいると識別するのに役立ちます。同様に、高分解能の距離プロファイルや、高分解能の速度プロファイル(ドップラー・スペクトル)は、将来のシステムが歩行者を明確に識別するのに役立ちます。

距離分解能に影響を及ぼす主要因の1つは、チャープの RF 掃引帯域幅です。表 2 に示すように、距離分解能は RF 掃引帯域幅に反比例します。たとえば、掃引帯域幅が 300MHz の場合、0.5m の距離分解能を実現できます。一方、掃引帯域幅が 1GHz の場合、15cm の距離分解能を実現できます。また、掃引帯域幅が非常に高い 4GHz の場合、非常に詳細な 3.75cm の距離分解能を実現できます。

### 高速ランプ・スロープと広い IF 帯域幅

広い RF 掃引帯域幅は距離分解能の向上につながりますが、一方で、チャープ持続時間を長くすることにつながる可能性があります。この特性は、2次 FFT 処理の手法を使用する場合、あいまいさなして検出可能な最大速度が制限されるという結果を招く可能性があります。チャープの持続時間が長くなると、ドップラー周波数シフトのサンプル数減少につながるからです。

高速ランプ・スロープをサポートすることは、より高い距離分解能を達成すると同時に最大速度に関する性能低下を避けるために必須です。たとえば、あいまいでない最大相対速度として時速 170km を達成するには、20 $\mu$ s 未満のチャープ持続時間をサポートする必要があります。mmWave センサ・システムが 1GHz の掃引帯域幅を 20 $\mu$ s のチャープ持続時間のうちに掃引することを要求する場合、ランプ・スロープを 50MHz/ $\mu$ s に高速化する必要があります。



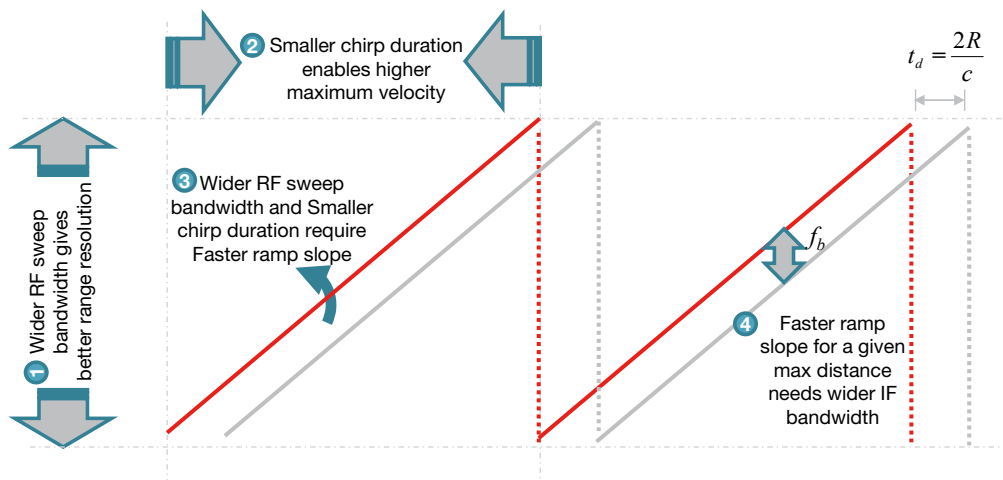


図 4: レーダ・システムの性能と mmWave フロント・エンドの要件。

より高速なランプ・スロープを使用すると、距離分解能と最大速度が向上しますが、特定の距離だけ離れた物体に関して、より高いビート周波数が生じることにつながります。したがって、より広い IF 帯域幅をサポートすると、レーダが物体を検出できる最大距離を確保できます。仮にアナログ・ベースバンド内で IF 帯域幅が制限される場合、検出距離の性能が低下するからです。図 4 に、高速ランプ・スロープと広い IF 帯域幅に関するニーズを示します。DSP の処理に関する MIPS とメモリの要件は、IF 帯域幅に比例して高くなることに注意してください。

高速ランプ・スロープと広い IF 帯域幅に関係するもう 1 つの利点は、ビート周波数の領域内より詳細に、複数の物体が分離されるという事実に関係しています。その結果、反射の強い物体からのノイズ・スカートを、その付近にある反射の弱い物体の検出に及ぼす干渉が少なくなります。また、アナログ・ベースバンド内でフリッカー・ノイズが及ぼす影響は、より広い IF 帯域幅を使用すると低減されます。

### 線形性の高いチャープ生成により 精度と再現性が向上

FMCW チャープの線形性は、物体の推定距離の精度に影響を及ぼす主なパラメータです。従来の開ループ電圧制御発振器 (VCO) をベースとするチャープ生成機能は、チャー

プ内で高い非線形性をもたらし、FFT のピークを不明瞭にする結果になる可能性があります。最終的に、推定距離の精度が低下しますこの説明が特に当てはまるのは、広い RF 掃引帯域幅 (4GHz 以下) を使用する場合であり、このような状況では線形性を確保する必要があります。

一方、閉ループ・フェーズ・ロック・ループ (PLL) を使用すると、線形性の高いチャープを生成できるので、距離の精度を向上させ、高い距離分解能の利点を最大限に活用することができます。また、VCO の非線形性を測定および補償する目的で、工夫を凝らした手法を使用する必要もなくなります。次のページの図 5 に、チャープの非線形性に関するいくつかの例を示し (チャープ内における瞬時的な周波数誤差の形で図示)、FFT ピークに対して及ぼした影響も図示します。

デジタル・ランプ・ジェネレータのロジックは、閉ループ PLL 内のチャープ生成を制御します。この PLL は、高精度で再現性の高い方法で、RF 周波数とタイミングを生成するほか、チャープとフレームの両方にもその特性が当てはまります。複数のチャープにまたがるこの再現性は、77GHz で実現できる高い速度分解能を活用する目的、またドップラー・スペクトルの特徴を将来のアプリケーションで活用するために高精度測定する目的で重要な特性です。

Impact of chirp nonlinearity on range accuracy

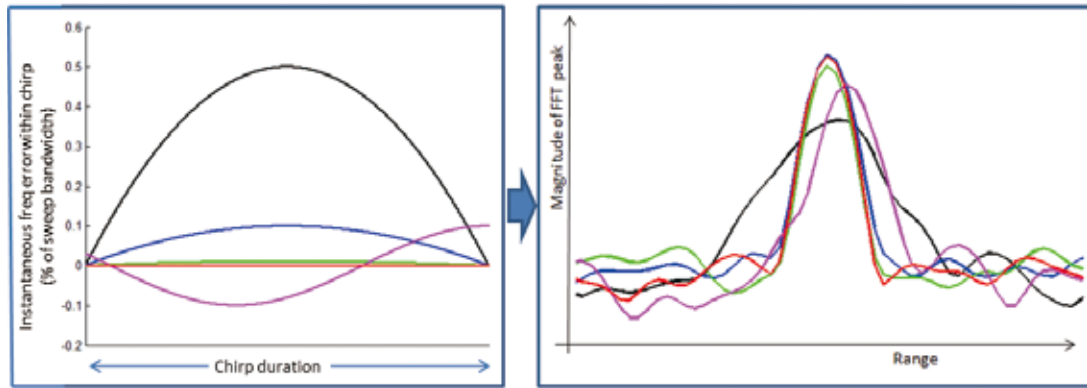


図 5: 線形性の高いチャープを使用する場合に、ピークの不明瞭性が低下し、精度が向上する状況の拡大表示。

## TI のセンサ製品ラインアップ

TI は、ミリ波センシング用のデバイス・ファミリを提供しています。AWR1243、AWR1443、AWR1642 の各デバイスは車載用アプリケーション向け、IWR1443 と IWR1642 の各デバイスは産業用アプリケーション向けです。AWR1243 センサの主な特長のいくつかに注目しましょう。

### AWR1243 センサ:

#### インテリジェントなミリ波フロント・エンド

AWR1243 ミリ波センサは、小型で高性能のフロント・エンドであり、閉ループの周波数シンセサイザから送出される高速チャープの FMCW 変調をサポートするほか、IF 帯域幅の広い複素ベースバンドを採用しています。ミリ波、クロック、アナログ・ベースバンドの回路はいずれも、TI のミリ波 CMOS テクノロジーを使用した単一のダイに統合されており、同じくダイに搭載済みのデジタル・サブシステムは、制御、キャリブレーション、デジタル・フロント・エンドを担当します。

図 6 に、AWR1243 ミリ波センサのブロック図を示します。この製品は 3 つの送信 (TX) チェーンを実装しています。各チェーンは、独立したバイナリ位相変調機能と可変ゲイン・パワー・アンプ、簡潔なシングルエンド出力機能で形成されており、アンテナとの直接的なインターフェイスを行います。4 つの受信 (RX) チェーンは、LNA、ミキサ、複素ベースバンドで形成されており、ベースバンドの 15MHz の IF 帯域幅を実現しています。連続時間方式のデルタ・シグマ ADC は信号をデジタル化し、デジタル・フロント・エンドはデシメーションとシグナル・コンディショニングを実施します。複素ベースバンド・アーキテクチャを採用した結果、干渉の

検出に関していくつかの利点が得られます。ホワイト・ペーパー『FMCW レーダ・システムにおける複素ベースバンド・アーキテクチャの使用法』をご覧ください。

クロック・サブシステムは、閉ループの N 分周 PLL 内で、RF 周波数に比べて 1/4 の周波数で高速チャープ FMCW 波形を生成します。

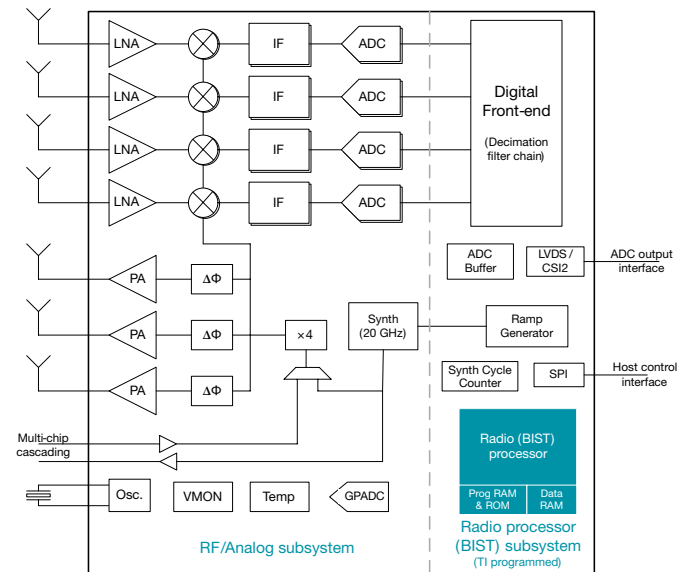


図 6: AWR1243 ミリ波インテリジェント・フロント・エンド・センサ。

同期信号は、複数の AWR1243 ミリ波フロント・エンド・センサをカスケード接続する場合に、このシンセサイザをバイパスする目的で供給されています。

無線プロセッサ・サブシステムを形成しているのは、制御とキャリブレーションを行う内部プロセッサ、フレキシブルなリアルタイム処理を行うランプ・ジェネレータ、関連するペリフェラルとインターフェイスです。ランプ・ジェネレータは、事前構成可能な4つのチャープ・プロファイルに従う512種類の独自チャープを使用してフレキシブルなチャープ生成を行い、アクティブなレーダ動作期間のうちにリアルタイム制御を実施する必要がなくなります。

主なデータ・インターフェイスは、一般的なカメラ・インターフェイスである CSI-2 であり、これを經由して外部 DSP に接続します。シンプルな API インターフェイスを使用して、SPI 経由で制御を行い、また、未処理データのキャプチャと記録を行うためのデバッグ・インターフェイスとして、LVDS も提供されています。

## インテリジェンスによる利点

マルチモード・レーダの実装、ミリ波フロント・エンドの使いやすさ、高度な機能安全と監視を目的とした、さまざまなチャープ構成を利用できるフレキシビリティは、新規の車載用レーダ・アプリケーションにとって重要な優先項目になります。この状況では、インテリジェントなミリ波フロント・エンドがオンチップ・プロセッサをベースとするインテリジェンスを活用して機能の制御と監視を行う手法が大きな利点になります。

図6に示すオンチップ BIST プロセッサは、チャープ生成パラメータをリアルタイム制御するので、外部ホストからリアルタイムではないメッセージングを通じてチャープ構成全体を簡単にロードすることができます。ミリ波フロント・エンドは、包括的な自己完結型なので、外部ホストの観点では非常に使いやすい製品です。BIST プロセッサは、環境の変化、特に温度と経年変化に対して、ミリ波フロント・エンドを自動的に適応させる役割を果たします。この結果、出力電力やゲインのような主なパラメータのドリフトに対し、よりの確な制御とセルフ・キャリブレーションを実施できます。

機能安全の観点では、インテリジェントなミリ波フロント・エンドは、フォールト・トレラントの各期間(数十ミリ秒)のうちに、安全に関連する自らのさまざまな RF/ アナログ機能ブロックを自律的に監視することができます。重要な安全監視機能として、TX 出力電力、RX ノイズ指数、シンセサイザの周波数誤差、RX 相互間でのゲインと位相のバランス維持、ボール破損の監視を挙げることができます。専用のオンチップ・プロセッサが利用できるため、これら多数の監視機能の要件を満たして安全を強化すると同時に、リアルタイムの制御や処理に関する制約を外部ホストから取り除きます。

TI は、ISO26262:2011 の要件を満たすように設計された、独自の開発プロセスを策定され、独立した第三者機関である TÜV SÜD から認定を取得済みです。この認定プロセスにこれら従い開発されたこれらの TI 製品は、SeoCs (Safety Elements out of Context) として開発されています。

## 複数の AWR1243 ミリ波デバイスのカスケード接続

距離と速度が同じ複数の物体に関して、センサはそれら複数のターゲットを分解するために角度に依存します。角度を推定するには、複数の受信アンテナの間で、受信信号の相対遅延を測定します<sup>[5]</sup>。角度分解能を向上させるには、多数のアンテナが必要になります。たとえば、2台の自動車が2mの間隔で、120mの距離にある場合、それらを分離するには1度の角度分解能が必要です。さらに、路上より上にある複数の物体を分離できるようにする場合も、このような角度分解能は役に立ちます。たとえば、坂の上や下、高架道路やアンダーパスなど現時点で自分とは高低差のある状況に位置する物体を識別する際に、必要な処理量を節約することもできます。水平解像度と垂直解像度の間には、トレードオフが成り立ちます。使用可能なアンテナの数が限定されている状況で、現在のレーダーは通常、解像度に制限がある水平アンテナ・アレイのみを採用しています。

AWR1243 センサは、同期機能を搭載しているため、複数のデバイスを1枚の PCB 上でカスケード接続し、密着度の高い大型アレイを製作して高分解能の処理を実現することができます。



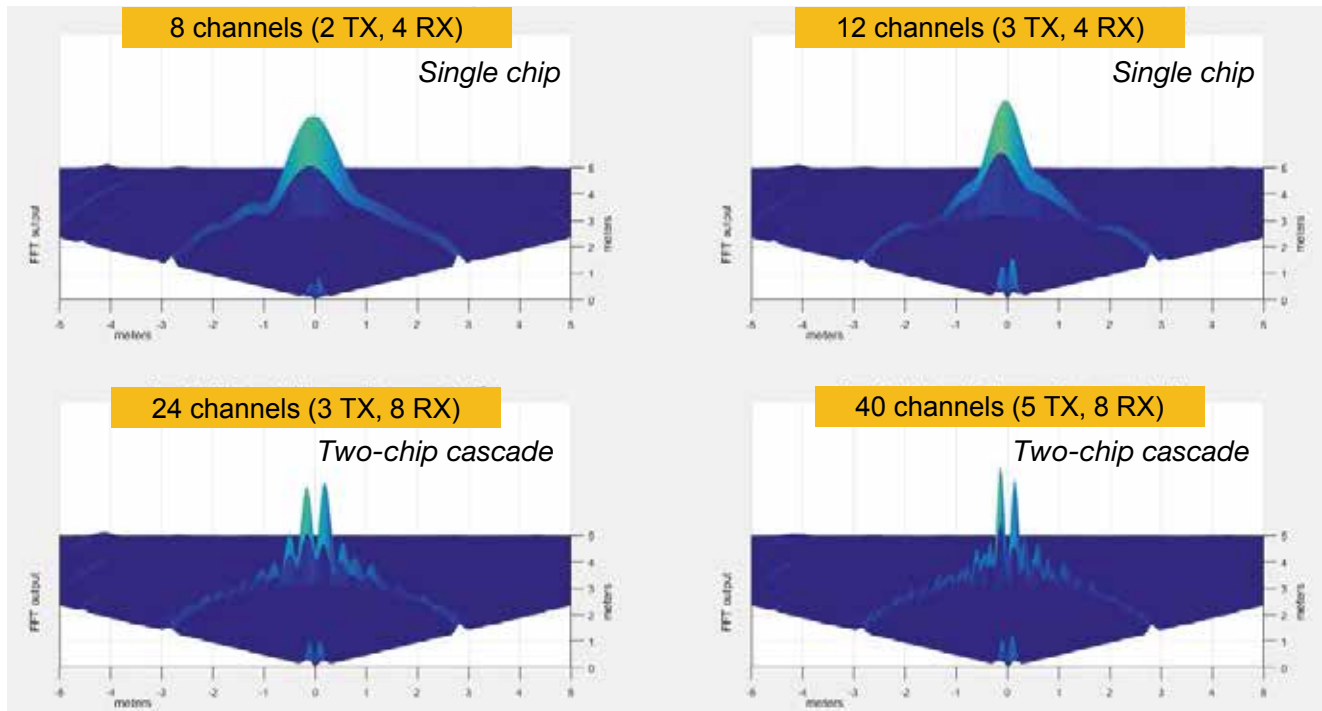


図 7: 1 チップ（上側）と 2 チップ（下側）の構成で、4 度の角度分解能を持つ 2 個のコーナー・リフレクターを使用して測定したレーダ応答。

この方法で複数の AWR1243 センサをマスター・デバイスとして構成した場合、これらのデバイスは変調された 20GHz の信号を出力することができます。複数の AWR1243 センサスレーブはその信号を受信し、自らの LO（局部発振器）として使用してレーダ信号処理を行うことができます。マスターによって生成された共有クロックとベースバンド同期パルスも使用する的方法で、シームレスなカスケード接続動作を実現できます。図 7 に、2 つのチャープを示します。とがった複数のピークが角度方向に明白に存在しており、近接した場所にある 2 つのターゲットが明確に分離されています。ただし、シングルチップを使用している例では、これらを識別することはできません。

この構成をさらに拡大し、1 個のマスター AWR1243 センサが 3 個のスレーブを駆動して、最大 192 個の仮想アンテナを使用する場合、水平（アジマス）方向で 1 度の角度分解能を実現することができますが、安全強化されたトンネル、頭上の道路標識、陸橋などを識別しようとする場合、本当に優れた画像処理クラスのセンサとしては、依然として低解像度にとどまります。

ここで、AWR1243 デバイスのいくつかの使用事例について説明します。

### 高性能 MRR 向けの AWR1243 センサと TDA3x プロセッサの組み合わせ

高性能の中距離レーダ（MRR）アプリケーションを実現するために、[AWR1243](#) ミリ波フロント・エンドを TI の [TDA3x](#) プロセッサのいずれかに接続することができます。この場合、[図 8](#) に示すように、データ送信と制御用 SPI 送信の目的で、CSI-2 を使用します。TDA3x プロセッサは、C66x 高性能 DSP と、エントリ・レベルのレーダ処理を効率的に実行できる組み込みビジョン・エンジン（EVE）を搭載しており、AWR1243 センサの帯域幅全体を取り扱うことができます。

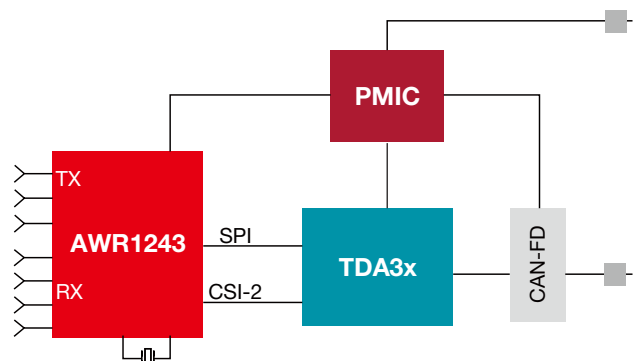


図 8: AWR1243 センサと TDA3x プロセッサを使用する中距離レーダ。

AWR1243 センサは、高い IF 帯域幅によりいっそうの長距離にわたって、高い距離分解能を維持できます。表 3 に、構成例を示します。ここでは、150m 離れた地点で 33cm の距離分解能を維持すると同時に、未処理のあいまいではない最大速度として時速 85km に対応しています。

AWR1243 sensor + TDA3x processor medium-range radar	
Sweep bandwidth	460 MHz
Range resolution	33 cm
Max unambiguous range	150 m
Ramp slope	15 MHz/μs
Chirp duration	30.7 μs valid (+ 7 μs inter-chirp)
Number of chirps	256
Max unambiguous rel. vel.	± 93 kmph
Max. beat frequency	15 MHz
ADC sampling rate (I, Q)	16.7 MSPS (complex)
Frame time	256 × 37.7 μs = 9.7 ms
Range FFT size	512 (complex)
Radar data memory	512 × 256 × 4 RX × 4 Bytes = <b>2 MB</b>

表 3: MRR 使用事例に適したチャープ構成の例。

帯域幅が 5MHz に制限されているセンサの場合、距離分解能と最大速度のどちらかを性能低下させる必要が生じます。1つの例として、5MHz の IF 帯域幅を使用する場合、距離分解能が 60cm の場合、最大速度は時速 60km に制限されます。

## AWR1243 ミリ波センサを使用した画像処理レーダ

自動車が搭載する自動化機能が増加するにつれて、レーダの性能を強化する必要が生じます。4 個のチップをカスケード接続した AWR1243 センサは、優れた角度分解能と距離分解能の両方を短距離の場合に広い視野にわたって実現すると同時に、長距離に拡大することもできます。マルチモードの例を表 4 に示します。この状況では、フレームの期間が短い場合、最大分解能は 40m という非常に大きい値に達します。一方、二輪車を検出するために距離を延長する場合、最大 250m に達します。これらはいずれも、1 度の角度分解能を維持しています。

Four AWR1243 cascaded 3D radar		
Sweep bandwidth	3333 MHz	275 MHz
Range resolution	4.5 cm ← high resolution	55 cm
Max unambiguous range	40 m	250 m → long range
Azimuth angular resolution	1°	1°
Cross-range resolution @ max range	70 cm	4.4 m
Elevation angular resolution	14°	14°
Ramp slope	54 MHz/μs	9 MHz/μs
Chirp duration	61.3 μs valid (+ 13 μs inter-chirp)	30.7 μs valid (+ 7 μs inter-chirp)
Number of chirps	16	256
Max beat frequency	15 MHz	15 MHz
ADC sampling rate (I, Q)	16.7 MSPS (complex)	16.7 MSPS (complex)
Frame time	16 × 74.3 μs = 1.2 ms	256 × 37.7 μs = 9.7 ms
Range FFT size	1024 (complex)	512 (complex)
Radar data memory	1024 × 16 × 16 RX × 4 Bytes = <b>1 MB</b>	512 × 256 × 16 × 4 = <b>8 MB</b>

表 4: 4 個の AWR1243 を採用したソリューションの長距離モードにおけるレーダの最大分解能。

これらの短距離モードと長距離モードを、各フレーム内でインターリーブすることができます。代表的な合計フレーム時間である 40ms より、動作時間がかなり短いからです。加えて、分解能がこれらの中間である中距離レーダに対応する、3 番目のモードを挿入することもできます。AWR1243 ミリ波センサには、4 個のプロファイルにマップされた 512 の独自チャープを格納するフレキシビリティがあります。短距離モードと長距離モードは通常、これらのプロファイルのうち 2 個を使用します。上記の表で示したように、チャープ数の合計は 272 であり、ホスト・マイコンにリアルタイムのオーバーヘッドをまったく発生させずに、付加的なモードを追加することもできます。

## まとめ

TI のミリ波デバイス・ファミリは、76 ~ 81GHz のインテリジェント・フロント・エンド(AWR1243 センサ) と、包括的なレーダシステムをオンチップで実現するために、フロント・エンドにオンチップ処理能力を組み合わせたデバイス (AWR1443 と AWR1642 の各センサ) で構成されています。

AWR1443とAWR1642の各デバイスは、別のホワイト・ペーパーで取り扱っています。設計者は、ニーズに合わせて最適なミリ波センサを選択する自由を活用できるようになりました。これらのセンサを採用すると、ミリ波システムの向上した性能を実際の機器で発揮し、より良好なADASアプリケーションで実現することができます。デベロッパにとっての利点は、多数存在します。

- AWR1243、AWR1443、AWR1642の各mmWaveセンサは、最大4GHzの掃引帯域幅を実現するように設計されています。
- AWR1243ミリ波センサは、最大100MHz/ $\mu$ sのランプ・スロープと、最大15MHzのIF帯域幅をサポートします。
- AWR1243、AWR1443、AWR1642の各センサは、閉ループPLLを使用して、高精度で再現性の優れた、線形性の高いチャープを生成します。
- また各センサは、オンチップのBISTプロセッサを搭載しており、リアルタイム制御、セルフ・キャリブレーション、機能安全の監視に対応します。そのため、使いやすさ、性能の向上、安全性の強化が実現します。

## 参照

1. Donald E. Barrick. [FM/CW Radar Signals and Digital Processing](#). NOAA Technical Report ERL 283-WPL 26, July 1973。
2. A.G. Stove. [Linear FMCW radar techniques](#). Paper presented at IEEE Proceedings F - Radar and Signal Processing, October 1992, 139 (5), 343-350.
3. Merrill Skolnik. *Introduction to Radar Systems* (New York: McGraw-Hill Education, 1981).
4. Graham M. Brooker. [Understanding Millimetre Wave FMCW Radars](#). Paper presented at First International Conference on Sensing Technology, Palmerston North, New Zealand, Nov. 21-23, 2005.
5. Sandeep Rao. *MIMO Radar*, Texas Instruments, 2017.

S-0107

### ご注意：

本資料に記載された製品・サービスにつきましては予告なしにご提供の中止または仕様の変更をする場合がありますので、本資料に記載された情報が最新のものであることをご確認の上ご注文下さいようお願い致します。

TIは製品の使用用途に関する援助、お客様の製品もしくはその設計、ソフトウェアの性能、または特許侵害に対して責任を負うものではありません。また、他社の製品・サービスに関する情報を記載していても、TIがその他社製品を承認あるいは保証することにはなりません。



## TIの設計情報およびリソースに関する重要な注意事項

Texas Instruments Incorporated ("TI")の技術、アプリケーションその他設計に関する助言、サービスまたは情報は、TI製品を組み込んだアプリケーションを開発する設計者に役立つことを目的として提供するものです。これにはリファレンス設計や、評価モジュールに関する資料が含まれますが、これらに限られません。以下、これらを総称して「TIリソース」と呼びます。いかなる方法であっても、TIリソースのいずれかをダウンロード、アクセス、または使用した場合、お客様(個人、または会社を代表している場合にはお客様の会社)は、これらのリソースをここに記載された目的にのみ使用し、この注意事項の条項に従うことに合意したものとします。

TIによるTIリソースの提供は、TI製品に対する該当の発行済み保証事項または免責事項を拡張またはいかなる形でも変更するものではなく、これらのTIリソースを提供することによって、TIにはいかなる追加義務も責任も発生しないものとします。TIは、自社のTIリソースに訂正、拡張、改良、およびその他の変更を加える権利を留保します。

お客様は、自らのアプリケーションの設計において、ご自身が独自に分析、評価、判断を行う責任がお客様にあり、お客様のアプリケーション(および、お客様のアプリケーションに使用されるすべてのTI製品)の安全性、および該当するすべての規制、法、その他適用される要件への遵守を保証するすべての責任をお客様のみが負うことを理解し、合意するものとします。お客様は、自身のアプリケーションに関して、(1) 故障による危険な結果を予測し、(2) 障害とその結果を監視し、および、(3) 損害を引き起こす障害の可能性を減らし、適切な対策を行う目的で、安全策を開発し実装するために必要な、すべての技術を保持していることを表明するものとします。お客様は、TI製品を含むアプリケーションを使用または配布する前に、それらのアプリケーション、およびアプリケーションに使用されているTI製品の機能性を完全にテストすることに合意するものとします。TIは、特定のTIリソース用に発行されたドキュメントで明示的に記載されているもの以外のテストを実行していません。

お客様は、個別のTIリソースにつき、当該TIリソースに記載されているTI製品を含むアプリケーションの開発に関連する目的でのみ、使用、コピー、変更することが許可されています。明示的または黙示的を問わず、禁反言の法理その他どのような理由でも、他のTIの知的所有権に対するその他のライセンスは付与されません。また、TIまたは他のいかなる第三者のテクノロジーまたは知的所有権についても、いかなるライセンスも付与されるものではありません。付与されないものには、TI製品またはサービスが使用される組み合わせ、機械、プロセスに関連する特許権、著作権、回路配置利用権、その他の知的所有権が含まれますが、これらに限られません。第三者の製品やサービスに関する、またはそれらを参照する情報は、そのような製品またはサービスを利用するライセンスを構成するものではなく、それらに対する保証または推奨を意味するものでもありません。TIリソースを使用するため、第三者の特許または他の知的所有権に基づく第三者からのライセンス、あるいはTIの特許または他の知的所有権に基づくTIからのライセンスが必要な場合があります。

TIのリソースは、それに含まれるあらゆる欠陥も含めて、「現状のまま」提供されます。TIは、TIリソースまたはその仕様に関して、明示的か暗黙的にかかわらず、他のいかなる保証または表明も行いません。これには、正確性または完全性、権原、続発性の障害に関する保証、および商品性、特定目的への適合性、第三者の知的所有権の非侵害に対する黙示的保証が含まれますが、これらに限られません。

TIは、いかなる苦情に対しても、お客様への弁済または補償を行う義務はなく、行わないものとします。これには、任意の製品の組み合わせに関連する、またはそれらに基づく侵害の請求も含まれますが、これらに限られず、またその事実についてTIリソースまたは他の場所に記載されているか否かを問わないものとします。いかなる場合も、TIリソースまたはその使用に関連して、またはそれらにより発生した、実際の、直接的、特別、付随的、間接的、懲罰的、偶発的、または、結果的な損害について、そのような損害の可能性についてTIが知らされていたかどうかにかかわらず、TIは責任を負わないものとします。

お客様は、この注意事項の条件および条項に従わなかったために発生した、いかなる損害、コスト、損失、責任からも、TIおよびその代表者を完全に免責するものとします。

この注意事項はTIリソースに適用されます。特定の種類の資料、TI製品、およびサービスの使用および購入については、追加条項が適用されます。これには、半導体製品(<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、評価モジュール、およびサンプル(<http://www.ti.com/sc/docs/sampterm.htm>)についてのTIの標準条項が含まれますが、これらに限られません。